

審査の結果の要旨

論文提出者氏名

サタール アーシャン

2005年10月8日午前8時50分（現地時間（UTC+5）、日本時間午後0時50分）にパキスタン北東部カシミール地方・インド国境近くでM7.6の地震が発生し、8万6千人以上の死者が報告された。震災直後、被災地復興のためのドナー会議がイスラマバードで開催され、この決定に基づき、国際協力機構（JICA）が被災地の橋梁復旧や病院の建設、ムザファラバードの復興計画策定に尽力し、日本の復興への貢献は現地で高く評価された。一方でこのような復興の進むジェラム（Jehlum）川沿いでは、活動した断層に沿って多くの不安定な斜面が露出した。ムザファラバードからおよそ40km上流のハティアン・バラ（Hattian Bala）の山中では地震で山腹が崩壊し8000万 m^3 にも及ぶ土砂がJehlum川の2つの支流をふさぎ大小2つの湖が出現した。そしてこの決壊の可能性が復興事業や地域住民にとっての潜在的な脅威として議論されていた。この潜在的な脅威に対応すべく地震直後に軍によって簡易な放水路が造られた。これで最大貯水量は8.6千万 m^3 から6.4千万 m^3 に減った。地震後の1年間は水力開発局（Water Power Development Authority, WAPDA）によって2つの天然貯水湖に流れ込む水量、漏水量などが計測されたが、土砂ダムに喫緊の危機がないと判断され、管理はWAPDAの手を離れ現地州政府に移管され、結局計測は打ち切りになってしまった。しかし土砂ダムは2010年の2月9日に突如決壊してしまう。

論文提出者はこの計測空白の時期を埋めるべく土砂ダムの変形計測のプロジェクトに積極的に関わり、観測された土砂ダムの変形から決壊の可能性があることを指摘し、仮に土砂ダムが決壊した場合の洪水のシミュレーションを進め、現地州政府にその結果を報告していた。また決壊後、貯水池の大幅な水位低下によって誘発された地滑りの調査も行っている。提出された論文は2005年の地震による天然ダムの生成から2010年の決壊、そして決壊後の現状に至るまでの詳細な科学的記録と得られた知見をまとめたものである。

第1章は地震が誘発した土砂ダムが引き起こす様々な長期的課題について概説し、2005年のカシミール地震によって出現したHattian Balaの土砂ダムに焦点を絞り、その長期観測を始めた経緯とそこで採用された計測の方針、そして本研究の目的を具体的に示している。

第2章は過去の土砂ダムの事例を詳細に紹介している。ここに挙げられた事例は1907年の地震で出現した高さ600mのUsui土砂ダム（タジキスタン）、1841年に決壊した高さ300mのRaikhot土砂ダム（パキスタン）、2008年四川大地震で

出現した多くの土砂ダム，そして日本では2004年中越地震による東竹沢や寺尾の土砂ダムを含む．この章ではこうした事例別の整理以上に，土砂ダムの形状，決壊を支配する様々な要因，地形・地質的特徴，決壊後の対応策など様々な側面から既往の研究を整理し，これまでに得られた知見をまとめている．そのうえで，生成から決壊に至る過程を長期的に観測した事例が少ないことを示し，稀有な観測記録の得られたHattian Bala土砂ダムに焦点を絞った本研究の意義を強調している．

第3章ではHattian Bala土砂ダムの生成直後からスタートした初期の観測，放水路の掘削などの対応策，その後論文提出者が深くかかわった長期観測の詳細と得られた記録の解析結果を示している．この中で，(1)ダム下流面法尻部から部分的な崩壊が始まり，これに伴い滲出する水の重水比率に変化が生じたこと（2009年6月），また(2)決壊の8か月前（2009年6月）から3か月前（2009年11月）までの間に天端部に10cm近い沈下が進行し，一方で法尻部の崩落箇所上部で数mm程度の隆起が認められたことなどが示されている．ダムの形状にわずかながらも変化が進行していること，また突然崩壊が進む傾向が認められること，そしてダム内部でスレーキングが進行していることが細粒分を多く含む滲出水から推測されたことを深刻に捉え，論文提出者はダムが決壊した場合の洪水予測を行っている．これらの成果は州政府を含む現地の関連機関に伝えられ万が一への避難・警戒に意が注がれている最中の2010年の2月9日にダムは決壊する．

第4章はダムの決壊後に行われた調査結果を整理している．決壊後のダムの形状，下流部の土砂の堆積状況，そして洪水痕跡を精密に計測し，第5章で提案する洪水流出解析の比較データとしている．また急激なダム湖の水位低下が引き起こした地滑り地の調査も行いそのメカニズムについて計測データをもとに検討を加えている．また衛星データ（Tropical Rainfall Measurement Mission, TRMM）から推定された降雨（降雪）記録をもとに決壊発生当時の放水路からの流出状況を推定し，流出量の増加が多く見積もっても $10\text{m}^3/\text{s}$ 程度に過ぎないこと，そして過去にそれ以上の降雨時にも決壊が発生していないことから，水位上昇が決壊の直接の原因と考えにくいことを示している．またダム湖に面した斜面崩壊が津波を起こしたシナリオも雪の薄く被る斜面に残る水面の痕跡に変化がないことをもって棄却している．可能性の最も高いと考えられるスレーキングの進行については，現地から採取した試料のスレーキング試験や一面せん断試験結果から力学的な考察を加えている．

第5章では既往の数値解析モデルのみならず，新たに決壊（breaching）進展モデルを提案し，また下流側の土砂堆積状況（移動床）の解析を行って．第3章，第4章で得られた現地の観測結果と比較している．決壊の進展にあたっては流路底の浸食に伴い流路側壁が流れに落ち込む過程をモデル化し，実際の洪水の発生状況を合理的に説明している．また下流側の土砂堆積状況の再現にも成功している．

第6章は本研究で得られた知見を整理し，これらが地震起因の土砂ダムへの防

災対策の中でどのように位置づけられていくかを示したうえで、今後の研究の発展の方向と課題をまとめている。

以上、本研究は、地震時に発生した土砂ダムの長期の変形の進展と決壊、そして決壊後の様々な課題について実際に生じた事例の詳細観測結果をもとに定量的なハザード解析に結びつく方法論を示したものである。解析対象となったジェーラム河上流域山間地の保全対策に直接的に反映できる情報を提示したにとどまらず、今後のリモートセンシング技術の進展などと相俟って、地震後の国土保全に発展的に活用できる研究成果を含むものとして評価できる。よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。